

## 박용디젤기관의 대기오염 저감을 위한 습식 회전형 다공성 디스크 시스템의 집진특성

여석준\* · 장창익  
부경대학교 환경공학과

### Collection characteristics of wet-type rotating porous disk system for air pollutants removal of marine diesel engines

Seok-Jun YOA\*, Chang-Ik JANG

*Departments of Environmental Engineering, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea*

The main object of this study is to investigate the collection characteristics of wet-type rotating porous disk system experimentally. The experiment is carried out to analyze the pressure drop and collection efficiency for the present system with the experimental parameters such as system inlet velocity, stage number, tube diameter, inlet concentration, etc. In results, for the present system, at 5 stage and  $v_{in}=1.8$  m/s, the pressure drop becomes significantly lower as 64 mmH<sub>2</sub>O in comparison with that of the conventional wet type scrubber (Venturi scrubber, over 250 mmH<sub>2</sub>O). The collection efficiencies increase with higher inlet velocity showing 92, 95.7, 98.4%, while SO<sub>2</sub> removal efficiencies decrease with increment of inlet velocity as 80, 65, 50% at  $v_{in}=1.08, 1.44, 1.8$  m/s and tube diameter  $D_t=10$  mm, respectively. The present system is to be considered as an effective compact system for a simultaneous removal of particle/gas phase pollutants from marine diesel engines.

Keywords : Rotating Porous Disk, Pressure Drop, Collection Efficiency

#### 서 론

각종 산업 및 발전시설, 운송시설 등 산업활동에 따른 대기오염물질 배출 증가로 인해 국·내외적으로 배출 규제가 강화되고 있는 실정이다. 더욱이 전 세계 수송물량 규모의 80%를 담당하는 해상운송을 통해 배출되는 대기오염물질은 전체 운송수단 배출량에 큰 부분을 차지하고 있으며, 선박엔진을 포함한 비도로 분야에서의 배기청정화에 대한 요구가 증대되고 있다. 선박의 경우 선박 디젤엔진에서 배출되는 대기오염물질은 입자상 오염물질과 가스상 오염물질이 있으며, 입자상 오염물

질의 경우 디젤엔진에서 배출되는 주요한 유해물질로서 국제해사기구 및 미국, 유럽연합 등에서는 대기오염 배기 배출물로 규정하여 그 배출량에 대한 규제를 시행하고, 규제를 강화해 나가고 있다. 가스상 오염물질의 경우 현재 Tier I, II 등을 통해 SO<sub>x</sub> 및 NO<sub>x</sub>를 규제하고 있고 향후 점차 강화될 예정이다 (Oh et al, 2006; Pak et al, 2009; Lee and Doo, 2011; Kim et al, 2012). 선박의 경우 SO<sub>2</sub> 배출량 감소를 위해 연료의 황 함유량을 규제하고 있으나, 규제를 강화시킬 경우 초저유황 연료사용 또는 글로벌(global) 및 ECA 지역별 엔진 연료를 변환하는 등

\*Corresponding author: sjyoo@pknu.ac.kr, Tel: 82-51-629-6526, Fax: 82-51-629-6523

의 방식으로 운전을 해야 하므로 경제적으로 실현 불가능하다는 의견에 따라, 2009년 MEPC에서 배기가스 정화시스템의 가이드라인을 공개하여 SO<sub>x</sub> 후처리 장치를 설치하여 배기가스 조성으로 동등한 황 함유량의 연료를 사용하는 것으로 간주할 수 있도록 하였다 (Kim et al, 2013). 위와 같은 배기 규제에 부합하기 위해 선박용 배기배출물 처리 장치개발이 필요하며, 이러한 입자상 오염물질과 가스상 오염물질 동시제거를 위해서는 주로 세정집진기가 이용된다. 세정집진기는 분진을 수반하는 가스 등을 미세 액적에 의해 세정하여 제거하는 장치이다 (Cooper and Alley, 1994). 일반적으로 세정집진기는 일반 건식 집진장치에 비해 처리가스의 온도 및 습도에 큰 제한을 받지 않는 특징이 있다. 주요 세정집진기로는 벤투리 스크러버 (Venturi scrubber), 사이클론 스크러버 (cyclone scrubber), 충전탑, 분무탑 등이 있다. 이중 벤투리 스크러버는 세정집진기 중 고효율 (90% 이상)의 장점을 지니지만, 압력손실 (250 mmH<sub>2</sub>O 이상)이 타 세정기에 비해 매우 높으며 세정액이 대량으로 요구되어 운전비가 많이 소요된다는 단점을 가지고 있다. 더욱이 기존 세정집진기의 문제점은 대기 오염물질 처리시 분사되는 미세 액적의 장치외부로의 배출 가능성이 크며, 이를 해결하기 위해 장치 출구에 디미스터 (demister) 즉, 일종의 필터 (filter type)를 설치하여 액적의 배출이 최소화 되도록 한다. 그러나 디미스터 설치시 미세 액적과 함께 응집된 먼지 등에 의하여 디미스터의 공극이 폐쇄되어 디미스터의 주기적 교체 문제가 발생하며, 또한 물 분사시 분진에 의한 노즐 막힘 현상이 발생된다 (Cho and Kim, 1990; Koo et al, 2006; Kim, 2013).

본 연구는 낮은 압력손실 (100 mmH<sub>2</sub>O 이하)과 고효율 (98% 이상)을 유지할 수 있으며 소형 선박 및 어선에

적용 가능한 콤팩트형 시스템으로, 물 분사노즐 없이 디스크 표면에 형성된 수막 (water film)에 의해 분진의 재비산을 방지하여 포집효율을 증가시킬 수 있으며, 노즐 막힘현상을 유발하지 않으면서 미세 액적의 배출을 최소화 할 수 있는 습식 세정 집진장치를 연구·개발하는 것이 중요 목적이다.

## 재료 및 방법

### 실험장치 및 방법

본 연구에서 사용된 실험장치 구성은 분진공급장치, 가스 주입장치, 습식 회전형 다공성 디스크 시스템 본체, 흡입송풍기, 유입유속·압력손실 및 집진 효율 등을 측정할 수 있는 계측시스템으로 이루어져 있으며, 유입 유속과 압력손실, SO<sub>2</sub> 측정은 각각 열선풍속계 (model 6162 Kanomax, accuracy ±3%), 압력측정장비 (midi LOGGER GL800 GRAPHTEC, accuracy ±0.25%), SO<sub>2</sub>계측장비 (E8500, E Instruments, accuracy ±0.25%)를 사용하여 계측하였다. 시스템 유입유속은 원형 덕트 내 유속을 측정함으로써 산출되었으며, 유속 측정점은 대기오염 공정시험법에 의해 덕트 단면의 14.6%와 85.4%되는 지점을 선정하였다. 본 장치의 압력손실은 장치 입·출구의 정압차에 의해 측정되었으며, 본 시스템의 이론적 압력손실을 나타내는 다음 식에 의해 평가·해석될 수 있다 (Kim and Yoa, 2010).

$$\Delta P = P_n - P_{n-1} \propto f(v_m^2, D_i, d_i, etc) \quad (1)$$

여기서,  $P_n$ 과  $P_{n-1}$ 은 디스크 전·후에서의 압력,  $v_m$ 은 시스템 유입유속 (m/s),  $D_i$ 는 튜브직경 (mm),  $d_i$ 는 디스크 간 간격 (mm)이다.

시스템 집진특성을 파악하기 위해 집진효율은 중량

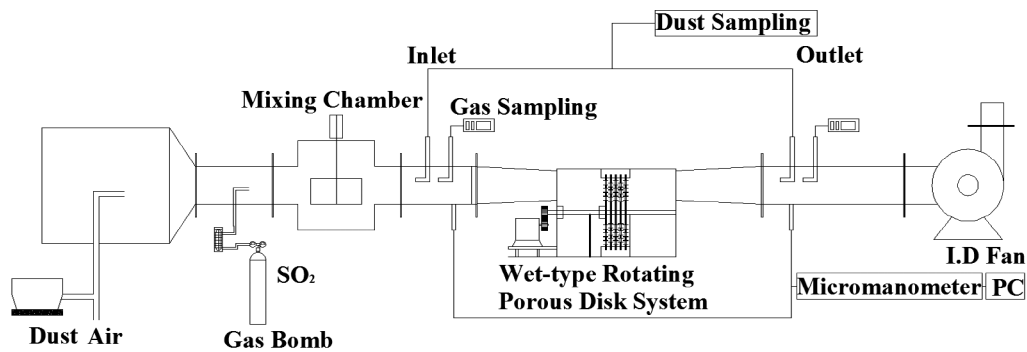


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

법 (gravity-metric method)에 의해 아래의 식으로 해석할 수 있다 (Cho and Kim, 1990).

$$\eta_t = \left(1 - \frac{m_{out}}{m_{in}}\right) \times 100 (\%) \quad (2)$$

여기서,  $\eta_t$ 는 총괄집진효율,  $m_{in}$ ,  $m_{out}$ 은 입 · 출구 중량농도 ( $g/m^3$ )이다.

Fig. 1은 본 집진장치의 실험을 위한 전체 시스템에 관한 모식도이다. 실험장치 최단부의 스크류방식 입자 공급장치에 의해 유입된 입자는 시스템의 유입 · 출부에서 샘플링되어 운전시간동안 샘플링된 분진질량을 측정하여 식 (2)에 의해 시스템 집진효율을 산정하였다. SO<sub>2</sub> 가스 또한 믹싱챔버 (mixing chamber)에 의해 최대한 혼합하여 유입 · 출부의 SO<sub>2</sub> 농도를 전술한 계측장비에 의해 제거효율을 분석하였다.

Fig. 2는 습식 회전형 디스크 시스템의 모식도이다. 본 시스템은 다단 (5단)으로 구성된 다공성 디스크의 절반이 물에 잠기도록 저수조를 설치하고, 축 회전을 통해 축에 장착된 디스크 표면의 가이드 베인에 의해 수조의 물을 끌어올려 디스크 표면에 수막이 형성되도록 하였다. 다단으로 구성된 이웃하는 각 디스크의 다공홀에 장착된 튜브는 서로 교차되도록 구성하여 미세먼지의 포집효과가 증대되게 하였다.

Fig. 3은 본 시스템의 각 단의 전면과 측면 단면도의

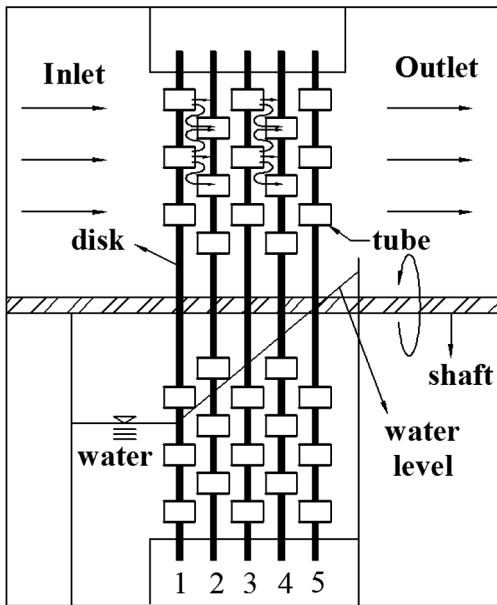


Fig. 2. Schematic diagram of wet-type rotating porous disk system.

상세한 구성을 나타낸 것이다. 디스크는 직경 195 mm, 전 · 후단 간격은 10 mm, 튜브 직경은 8, 10 mm 이며, 각 단별로 24개씩 전단과 후단의 튜브가 서로 교차하도록 구성되어있다. 튜브와 튜브사이에는 안내깃 (guide vane)을 설치하여 디스크의 표면에 수막이 잘 형성되도록 하였다.

Fig. 4는 본 시스템의 기류패턴 및 입자 포집 메커니즘을 나타낸 그림이다. 분진을 함유한 강한 기류가 디스크의 튜브를 통과할 때 고속의 분사류를 형성하여 높은 관성력에 의해 미세분진은 기류를 이탈하여 후단의 디스크 전면에 형성된 수막 (water film)에 충돌 · 포집되며 (impaction 효과), 디스크에 인접한 기류에 함유된 미세먼지는 난류 및 브라운 확산에 의해 포집된다. 디스크 표면에 포집된 분진은 수막에 부착되어 재비산 되지 않으며, 포집되지 않은 미세입자는 기류를 따라 다음 단으로 이동하여 동일 과정을 반복하면서 집진될 수 있다 (Yoa and Kim, 2007).

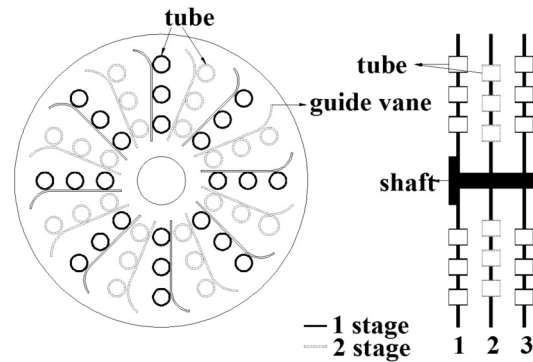


Fig 3. Schematic diagram of porous disk.

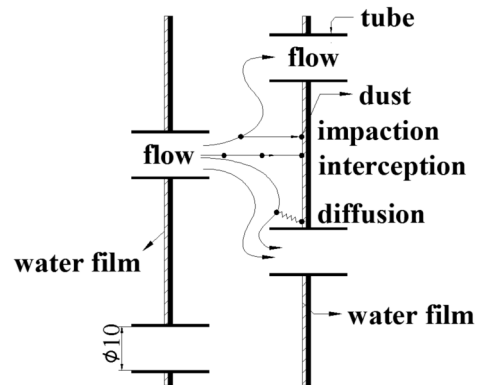


Fig. 4. Collection mechanism for present system.

Table 1. Experimental conditions

Description	Condition
Particle	fly ash
Dust inlet concentration(g/m <sup>3</sup> )	1.5, 3, 4.5
Gas	SO <sub>2</sub>
Gas inlet concentration(ppm)	20
System Inlet velocity(m/s)	1.08, 1.44, 1.8
Tube diameter(mm)	8, 10
Tube velocity(m/s)	9, 12, 15
Stage number	1, 2, 3, 4, 5
Revolutions per minute(rpm)	0, 9, 12, 15

본 시스템의 압력손실 및 집진특성을 해석하기 위해 유입유속, 튜브직경, 단 (stage) 수, 디스크 회전수 등의 실험변수로 실험을 수행하였으며, 이에 따른 실험조건을 Table 1 에 나타내었다.

실험용 분진

임팩션 (impaction) 및 확산 등의 주요 집진메커니즘은 입자크기에 크게 의존되므로 입자상 오염물의 입경 분포는 집진특성에 중요 변수가 될 수 있다. 실험에 사용한 분진은 화력발전소에서 채취한 입자로 입경 분석기 (GRIMM Aerosol Dust Monitor & Counters)를 통해 분석하였으며, 입경별 분포를 Fig. 5에 나타내었다. 입경 분석기는 15개의 채널을 이용하여 입자의 수 농도 (particle number concentration)를 측정하였으며, 개수기준 평균입경은 0.63 μm로 나타났다.

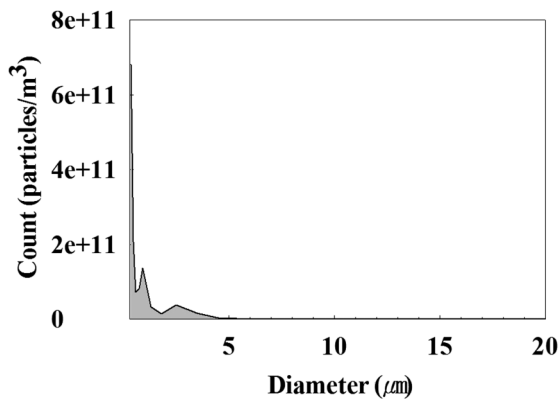


Fig. 5. Particle number distribution.

결과 및 고찰

압력손실 특성

본 시스템의 압력손실은 집진효율과 더불어 시스템 설계의 중요한자가 된다. 압력손실에 영향을 미치는 주

요 실험변수로 시스템 유입유속, 단 수, 튜브 직경 등을 들 수 있다. 압력손실은 식 (1)에 의해 해석될 수 있으며, 이들 변수에 따라 압력손실특성이 변화될 수 있다.

Fig. 6은 본 시스템의 유입유속 ( $v_m$ ) 및 단 수 증가 (1~5단)에 따른 압력손실 변화를 나타낸 것이다.  $v_m = 1.08$  m/s (튜브통과유속  $v_t = 9$  m/s)인 경우 9, 14, 21, 28, 33 mmH<sub>2</sub>O,  $v_m = 1.80$  m/s ( $v_t = 15$  m/s)에서 17, 27, 39, 51, 64 mmH<sub>2</sub>O로 단 수 증가에 따라 압력손실은 증가하며, 유입유속 증가에 따라 압력손실 증가 구배는 증대되었다. 각 단에서 유입유속이 증가할 때 식 (1)에 의해 압력손실은 유속의 제곱에 비례하여 증가함을 알 수 있다.

Fig. 7은 본 시스템에서 유입유량  $Q_m = 0.85$  m<sup>3</sup>/min ( $v_m = 1.8$  m/s)일 때 튜브직경 및 단 수 증가 (1~5단)에 따른 압력손실 변화를 나타낸 것이다. 튜브직경  $D_t = 10$  mm

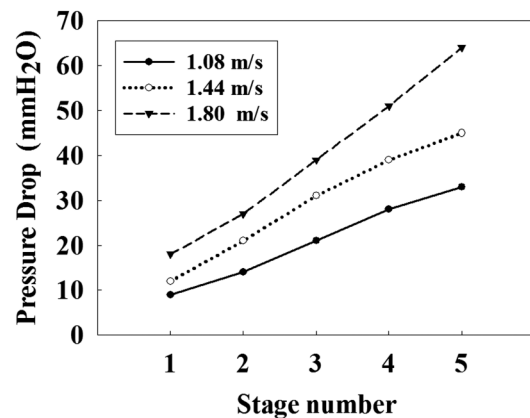


Fig. 6. Pressure drop with stage number and inlet velocity ( $D_t = 10$  mm).

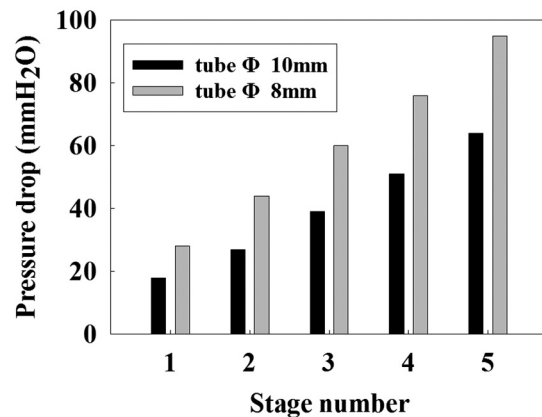


Fig. 7. Pressure drop with stage number and tube diameter ( $v_m = 1.80$  m/s).

(튜브통과유속  $v_t=15$  m/s)인 경우 단수 증가에 따라 17, 27, 39, 51, 64 mmH<sub>2</sub>O,  $D_t=8$  mm ( $v_t=23.4$  m/s)의 경우 28, 44, 60, 76, 95 mmH<sub>2</sub>O로 단수 증가에 따라 압력손실은 증가하며, 튜브직경 8 mm인 경우 10 mm에 비해 압력손실은 약 1.5배 높게 나타났다. 이는 동일 유량일 때 튜브직경이 작을수록 튜브통과유속이 증가하기 때문이며, 식 (1)에 의해 압력손실은 증가한다.

**입자상 오염물질의 집진 특성**

본 시스템의 집진효율에 영향을 미치는 중요 변수는 유입유속, 단수, 튜브 직경, 회전수 등이며 주요 포집 메커니즘은 임팩션 효과, 차단, 난류확산, 브라운 확산 등이 될 수 있다 (Kim et al, 2002). 본 시스템은 압력손실(압력강하)에 따른 수위차로 인해 Fig. 2에서 보듯이 후단으로 갈수록 수위는 높아지며 전단은 후단에 비해 더 많은 수의 튜브가 집진에 관여한다. 따라서 후단으로 갈수록 전단에 비해 튜브통과유속 증가에 따른 관성력증대로 미세입자의 집진에 효과적이다. Fig. 8은 디스크 회전수 12 rpm (습식시스템)에서 유입유속 및 단수 증가(1~5단)에 따른 집진효율을 나타낸 것이다.  $v_{in}=1.08$  m/s ( $v_t=9$  m/s)에서 단별 집진효율은 42.2, 80.8, 89.6, 91.5, 92.0%,  $v_{in}=1.80$  m/s ( $v_t=15$  m/s)의 경우 68.5, 92.2, 94.7, 96.8, 98.4%로 단수와 유입유속이 증가할수록 집진효율은 상승하였다.

임팩션효과가 중요 메커니즘인 시스템에서 포집효율 50%의 절단입경 (cut-off diameter)은 식 (3)으로 표현된다 (Ji et al, 2001).

$$d_{p, cut} = \sqrt{\frac{9\mu D_t Stk}{\rho_p C_c v_t}} \tag{3}$$

여기서,  $d_{p, cut}$ 는 절단입경 ( $\mu\text{m}$ ),  $\mu$ 는 가스의 점성계수 ( $\text{g/cm}\cdot\text{s}$ ),  $Stk$ 는 Stokes 수,  $\rho_p$ 는 입자밀도 ( $\text{g/cm}^3$ ),  $C_c$ 는 커닝햄 보정계수,  $v_t$ 는 튜브통과유속 (m/s)이다.

시스템에서 절단입경보다 큰 입자는 포집되므로 식 (3)에서 보는 바와 같이 유속이 증가함에 따라 절단입경은 감소하며, 이에 따라 집진효율이 증가함을 알 수 있다.

또한 시스템 전단 (1, 2단)에서 높은 집진효율을 나타내며, 후단으로 갈수록 효율 상승구배는 감소함을 알 수 있다. 이는 전단에서는 주로 입경이 큰 입자가 포집되며, 후단으로 갈수록 포집되지 않은 미세입자의 낮은 관성력에 의해 집진효율이 감소하기 때문이다.

Fig. 9는 5 단에서 디스크 회전수 및 유입유속에 따른 집진효율을 나타낸 것이다.  $v_{in}=1.08$  m/s에서 회전수의 증가 (0, 9, 12, 15 rpm)에 따른 집진효율은 86.6, 91.8, 92.0, 92.2%,  $v_{in}=1.80$  m/s인 경우 93.2, 98.4, 98.4, 98.4%로 나타났다. 회전수가 0 rpm (dry-type)인 경우, 즉 디스크에 수막이 형성되지 않은 경우 회전수 9, 12, 15 rpm으로 수막을 형성시킨 디스크 (wet-type)보다 5% 정도 낮은 집진효율을 보였으며 회전수 9, 12, 15 rpm의 경우 집진효율의 차이가 없었다.

습식 (wet-type)의 경우 디스크의 수막형성에 의해 디스크에 포집된 입자의 재비산을 건식 (dry-type) 시스템에 비해 최소화 할 수 있으며, 튜브를 통과한 높은 속도의 분사류와 수막의 충돌현상에 의해 생성된 미세액적과 입자와의 접촉이 집진효율 상승에 기여한 것으로 판단된다.

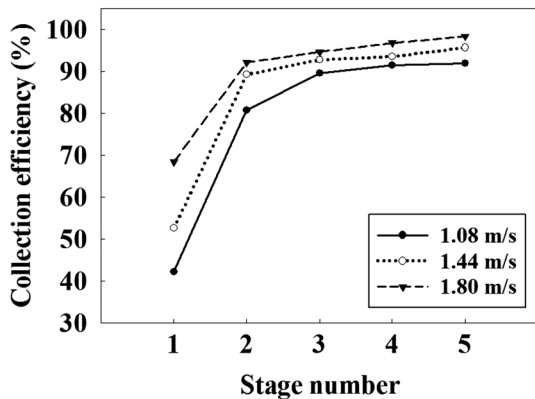


Fig. 8. Collection efficiency with stage number and inlet velocity ( $D_t=10$  mm, 12 rpm,  $C_{in}=3$  g/m<sup>3</sup>).

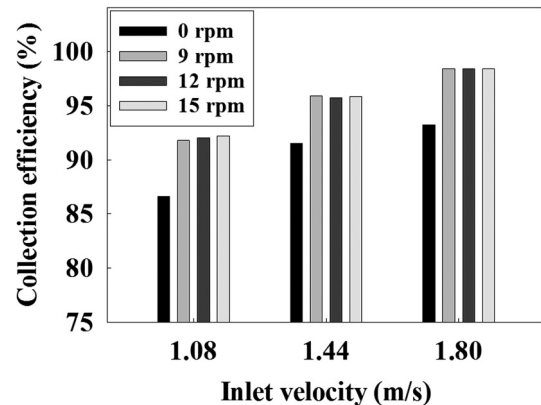


Fig. 9. Collection efficiency with rotational speed (5 stage,  $D_t=10$  mm,  $C_{in}=3$  g/m<sup>3</sup>).

Fig. 10은 5 단, 디스크 회전수 12 rpm에서 튜브직경 및 튜브통과유속에 따른 집진효율특성을 나타낸 것이다. 튜브직경  $D_t=10$  mm에서 튜브통과유속  $v_t=9, 12, 15$  m/s ( $v_m=1.08, 1.44, 1.8$  m/s)의 경우 92, 95.7, 98.4%, 동일 튜브통과유속조건에서  $D_t=8$  mm인 경우 92.5, 96.5, 99.2%의 집진효율을 나타냈다. 튜브통과유속이 증가함에 따라 집진효율이 증가하였으며, 동일 튜브통과유속에서  $D_t=8$  mm가 10 mm인 경우보다 집진효율이 0.2~0.8% 더 높았다. 이는 위의 식 (3)에서 보는 바와 같이 튜브직경이 감소함에 따라 절단입경은 감소하며, 이는 집진효율 상승을 의미한다.

Fig. 11은 5 단, 회전수 12 rpm에서 유입유속 및 유입농도 변화에 따른 집진효율 특성을 나타낸 것이다. 유입농도  $C_{in}=1.5, 3, 4.5$  g/m<sup>3</sup>에서  $v_m=1.08$  m/s일 때 집진효율은 90.8, 92, 93.6%,  $v_m=1.80$  m/s의 경우 97.7, 98.4, 98.6%

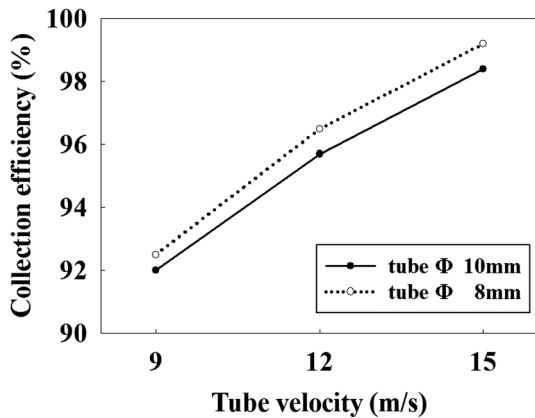


Fig. 10. Collection efficiency with tube diameter (5 stage, 12 rpm).

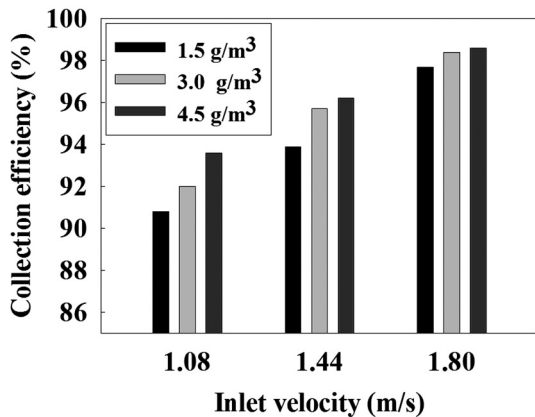


Fig. 11. Collection efficiency with inlet concentration (5 stage, 12 rpm,  $D_t=10$  mm).

로 나타났다. 유입농도가 증가함에 따라 집진효율은 증가하며, 이는 농도가 증가하면서 입자 운동에 영향을 주는 항력 (drag force)이 감소하고, 분진 간의 응집으로 평균입경이 커지는 효과가 더해져 관성력 증가로 인해 집진효율이 상승한 것으로 판단된다.

#### 가스상 오염물질의 제거효율 특성

본 시스템의 디스크 표면의 수막현상에 의한 흡수 (absorption) 메커니즘은 가스상 오염물질의 주요 처리방법 중의 하나로 물질 이동 원리를 이용하여 분리·제거하는 방법이다 (Koo et al, 1993). 물질이 용액 내로 이동할 때 물리·화학적 평형관계가 존재하며, 가스상 오염물질을 흡수액과 접촉시킬 때 물리적 평형관계 내에서 접촉 면적을 크게 하고 접촉시간을 충분히 유지시키는 것이 중요하다.

물리적 평형관계는 Henry의 법칙에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다 (Sawyer et al, 2008).

$$P_A = H X_A \quad (4)$$

여기서,  $P_A$ 는 기체분압,  $H$ 는 Henry 상수,  $X_A$ 는 액상 중의 가스농도이다.

본 시스템에서는 용해도가 비교적 높은, 즉 Henry 상수가 낮은 SO<sub>2</sub> 가스를 선택하여 실험을 수행하였다.

Fig. 12는 5 단, 회전수 15 rpm일 때 유입유속에 따른 SO<sub>2</sub>의 제거특성을 나타낸 것이다.  $v_m=1.08, 1.44, 1.80$  m/s일 때 SO<sub>2</sub> 제거효율은 각각 80, 65, 50%로 유입유속이 증가함에 따라 SO<sub>2</sub>의 제거효율이 감소하였다. 유입유속의 증가는 유량증대에 의한 액 (수막)·가스비의

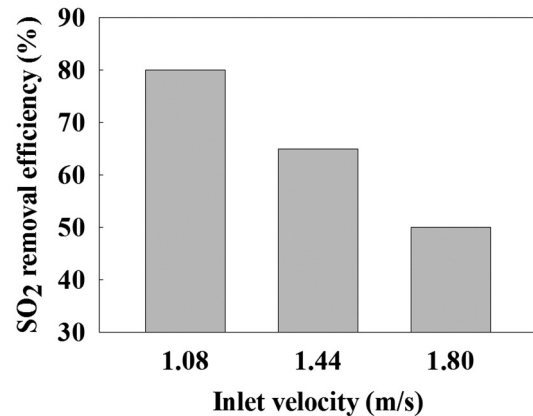


Fig. 12. SO<sub>2</sub> removal efficiency with inlet velocity (5 stage,  $\Phi=10$  mm).

감소와 시스템내의 체류시간, 즉 가스-흡수액의 접촉 시간을 감소시켜 제거효율 감소를 초래한다.

Fig. 13은 5 단,  $v_m=1.08$  m/s 일 때 회전수의 변화에 따른  $SO_2$ 의 제거효율을 나타낸 것이다. 회전수가 9, 12, 15 rpm인 경우 70, 75, 80%로 디스크의 회전수가 증가함에 따라  $SO_2$ 의 제거효율이 증가함을 알 수 있다. 이는 회전수가 증가하면 디스크 표면의 수막형성주기가 짧아져  $SO_2$ 로 포화된 수막의 교체주기가 단축되므로 액·가스 흡수 (adsorption)효과가 증대되므로  $SO_2$ 의 제거효율이 증가한 것으로 판단된다 (Park et al, 2011).

Fig. 14는 5 단, 회전수 15 rpm에서 튜브직경 및 튜브 통과유속에 따른  $SO_2$ 의 제거효율을 나타낸 것이다. 튜브 통과유속  $v_t=9, 12, 15$  m/s일 때  $D_t=10$  mm에서 80, 65, 50%,  $D_t=8$  mm인 경우 85, 70, 60%로 튜브직경 감소 ( $D_t=10 \rightarrow 8$  mm)에 따라 동일 튜브통과유속에서 5% 이상

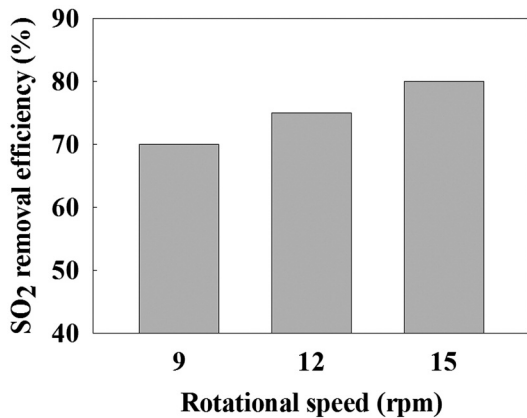


Fig. 13.  $SO_2$  removal efficiency with rotational speed (5 stage,  $D_t=10$  mm).

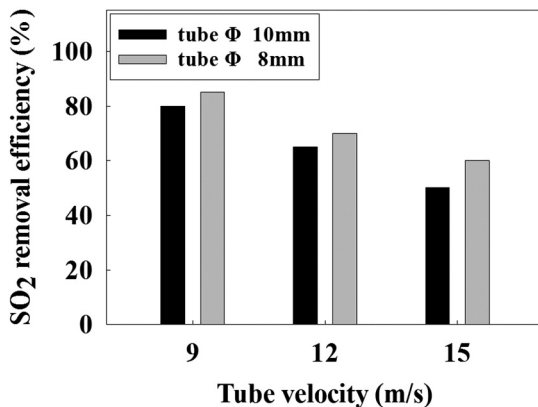


Fig. 14.  $SO_2$  removal efficiency with tube diameter (5 stage, 15 rpm).

의  $SO_2$  제거효율 상승을 나타낸다. 튜브직경의 감소는 튜브통과기류가 수막과 접촉할 수 있는 확률을 향상시켜  $SO_2$ 의 제거효율이 증가하는 것으로 판단된다.

## 결론

본 시스템은 다공성 디스크 일부가 저수조에 잠겨 회전하면서 디스크에 수막현상을 유발하여 물 분사시스템 없이 디스크에 포집된 먼지 입자의 재비산 방지 및 효율 증대를 유도할 수 있는 집진 시스템이다. 본 시스템의 압력손실 및 집진특성을 해석하기 위해 유입유속, 디스크 회전수, 튜브 직경 및 유입농도 등 다양한 실험 변수에 따른 실험을 수행하여 시스템 최적설계를 위한 결과를 얻고자 하였다. 시스템 최고 유입유속  $v_m=1.8$  m/s,  $D_t=10$  mm에서 압력손실, 즉  $\Delta P$ 는 64 mmH<sub>2</sub>O로 기존 고효율 습식 세정기인 벤투리 스크러버 ( $\Delta P=250$  mmH<sub>2</sub>O 이상)에 비해 매우 낮게 나타남을 알 수 있다.  $v_m=1.8$  m/s 및 디스크 회전수 0, 12 rpm에서 집진효율은 93.2, 98.4%로 0 rpm, 즉 건식시스템에 비해 12 rpm의 습식시스템의 효율이 5%정도 높게 나타나며, 이는 디스크에 형성된 수막에 의해 포집된 분진의 재비산을 감소시키기 때문이다. 튜브통과유속  $v_t=15$  m/s,  $D_t=8$  mm에서 집진효율은 99.2%로  $D_t=10$  mm의 98.4%에 비해 높은 효율을 유지하는데, 튜브직경이 감소할수록 튜브통과기류 중 수막과의 접촉비율이 높아지면서 효율증대를 초래하는 것으로 판단된다.  $SO_2$  제거특성은 입자상 오염물질 제거와는 상반적으로 시스템 유입유속이 증가할수록 제거효율은 감소하며,  $v_m=1.08$  m/s에서 디스크 회전수 증가 (9, 12, 15 rpm)에 따라  $SO_2$  제거효율은 70, 75, 80%로 높게 나타남을 알 수 있다. 이는 회전수가 커지면서 디스크 표면의 수막형성주기가 짧아지며, 즉  $SO_2$  가스로 포화된 수막의 교체주기가 단축되기 때문이다. 본 시스템은 미세액적배출 없이 고효율 및 낮은 압력손실로 입자/가스상 오염물을 동시에 처리할 수 있는 콤팩트형 습식집진장치로 선박 대기오염 저감시스템의 기초설계에 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 사료된다.

## REFERENCES

Cho BH and Kim JH. 1990. Air pollution prevention technology. Dong Hwa Technology, 23, 260 – 322.  
Cooper CD and Alley FC. 1994. Air pollution control : A design

- approach (second edition), 101 – 125, 217 – 247.
- Ji JH, Bae GN and Hwang JH. 2001. Design and Performance Evaluation of a Three Stage Impactor. *J KOSAE* 17 (6), 441 – 450.
- Kim HJ, Han BW, Cho GB and Hwang SC. 2013. Performance test of a simultaneous PM and SO<sub>x</sub> removal system for marine diesel engines. *Trans KSME\_B* 5, 104 – 105.
- Kim HJ, Han BW, Cho GB and Kim YJ. 2012. Particle removal performance of a dry electrostatic precipitator for marine diesel engines and boilers. *Trans KSME\_B* 5, 250 – 51.
- Kim IK and Yoa SJ. 2010. Collection Characteristics of Multi-layer Multi-stage Porous Plate System. *J Kor Soc Power Sys Eng* 14, 10 – 16.
- Kim JY. 2013. Collection Characteristics of Multi-layer Multi-stage Porous Plate System with Water Spray. MS. Thesis, Pukyong National University, Korea, p. 62.
- Kim KD, Cho YS and Yoa SJ. 2002. Collection Characteristics of Multi-stage Porous Plate System with Impaction Effect. *J KSEE* 24, 789 – 799.
- Koo JH, Kim MC, Park SC, Park TS, Ahn BG, Oh SW, Lee GS and Lee SJ. 2006. Atmosphere Environmental Device Design II, Dong Hwa Technology, Seoul, Korea, 226 – 233.
- Koo WH, Kim SD, Dong JI, Na JK and Hong JH. 1993. A Study on SO<sub>2</sub> Removal Variation According to Air Pressure in Semi-Dry Scrubber. *J KSEE*, 373 – 376.
- Lee YC and Doo HW. 2011. A Study on the IMO Regulations regarding GHG Emission from Ships and its Implementation. *J Nav Port Res* 35, 371 – 380. (doi : 10.5394/KINPR.2011.35.5.371)
- Oh SH, Kim HK and Yoo BH. 2006. An Experimental Study on the Emission Characteristics of Diesel Particulate Matter. *Pro Kor Soc Mar Eng Con* 93 – 94.
- Pak MS, Hong RJ and Han NH. 2009. A Study on the International Instruments of Air Pollution Prevention from Ships. *The Kor Ins Mar Law* 21, 1 – 36.
- Park YO, Park HJ, and Kim YH. 2011. SO<sub>2</sub> Removal by Internal Circulation of de-SO<sub>x</sub> Absorbents. *J. KOSAE* 27, 672 – 680. (doi : 10.5572/KOSAE.2011.27.6.672)
- Sawyer CN, McCarty and Perry L. 2008. Chemistry for Environmental Engineering and Science (5th Edition), McGraw-Hill, 25 – 27.
- Yoa SJ and Kim DG. 2007. Collection Characteristics of Wet Type Multi-stage Porous Plate System for Dust Removal under Tunnel Construction. *The 2007 Enviro Soc Joint Confer*, 1781 – 1784.

---

2014. 7. 15 Received

2014. 8. 13 Revised

2014. 8. 14 Accepted